

施肥模式对收获后稻田 CO₂ 释放的影响

张淑娟, 王立, 马放, 张雪, 徐亚男, 李哲, 姜晓峰

(哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨)

摘要: 为探讨施肥模式对收割后稻田 CO₂ 垂直释放特征的影响, 利用 CIRAS-2 便携式光合测定仪对施加氮肥、磷肥和菌肥的水稻土 CO₂ 释放速率及其影响因素进行测定, 并对二者的相关性进行分析. 结果表明: 施加氮肥后, 收割后稻田 0 cm 界面土壤 CO₂ 的释放速率提高 97.73%, 10 cm 界面和 20 cm 界面分别降低 39.93% 和 31.36%. 施加磷肥后, 收割后稻田 0 cm 界面 CO₂ 的释放速率与对照 (CK) 差异无统计学意义, 10 cm 界面降低 33.84%, 20 cm 界面提高 48.03%. 施加菌肥对收割后稻田 3 个界面 CO₂ 的释放速率都无显著影响. 收割后稻田 CO₂ 释放速率与该界面土壤含水率的相关性受施肥模式的影响, 其影响程度随着土层的加深依次减轻. 与氮肥和磷肥相比, 菌根菌肥对土壤 CO₂ 释放影响不显著.

关键词: 化肥; CO₂ 释放; 土壤呼吸; 菌根菌肥; 稻田

中图分类号: X5 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2012)12-0051-05

Effects of fertilizer-modes on soil CO₂ emission in post-harvest paddy

ZHANG Shu-juan, WANG Li, MA Fang, ZHANG Xue, XU Ya-nan, LI Zhe, JIANG Xiao-feng

(State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: The release rate of soil CO₂ and its factors were measured with CIRAS-2 portable photosynthesis system, then their relationship was analyzed to investigate the influences of the additional nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer and arbuscular fertilizer on characteristics of soil CO₂ release in paddy. The results showed that: (1) The addition of nitrogen fertilizer resulted in soil CO₂ release rate rising by 97.73% in 0 cm layer, and dropped by 39.93% and 31.36% in 10 cm and 20 cm layer, respectively. (2) While there was no significant difference between soil CO₂ release rates after the addition of phosphate fertilizer and of CK in 0 cm layer, the rate dropped 33.84% in 10 cm layer and rose 48.03% in 20 cm layer. (3) The additional arbuscular fertilizer had no significant influence on all three layers. (4) The related coefficients of soil CO₂ releasing rates and their factors in the same layers were affected by the fertilizer-modes, and its impact became lighter with the increasing of depth. Compared with nitrogen fertilizer and phosphate fertilizer, mycorrhizal fertilizer had no significant influence on the soil CO₂ release.

Key words: chemical fertilizer; CO₂ release; soil respiration; mycorrhizal fertilizer; rice

植物的光合作用是农田生态系统碳蓄积的重要途径, 而土壤呼吸又使得农田生态系统成为全

球碳排放的重要源头^[1-5]. 收割后农田生态系统不具有碳蓄积功能, 只具有碳排放功能. 因此, 收割后农田土壤 CO₂ 释放速率的准确测定是估算大尺度碳蓄积和碳排放的重要前提^[6].

目前, 通过选择环保的施肥方式对作物的营养元素进行科学管理, 从而改变土壤 CO₂ 释放速率是增大农业碳库的重要措施^[5]. 研究表明, 与不施肥相比, 施加有机肥^[7] 和秸秆还田^[8] 都有提高土壤 CO₂ 释放速率的作用. 施用氮肥对土壤

收稿日期: 2011-11-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179041); 水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07201003); 国家创新研究群体科学基金资助项目(51121062); 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学)自主课题(2011TS07).

作者简介: 张淑娟(1984—), 女, 博士研究生;

马放(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 王立, wli@hit.edu.cn.

CO₂ 释放速率的影响目前还存在争议. 孟凡乔等^[9]的研究表明,施用氮肥对土壤 CO₂ 释放速率的影响不显著. P Marschner 等^[10]的研究表明,施用氮肥会显著提高 CO₂ 释放速率. 但也有研究指出施用氮肥会降低土壤 CO₂ 释放速率^[11-12]. 另有研究表明,土壤呼吸速率取决于施氮水平,即中氮处理 > 高氮处理 > 低氮处理 > 空白处理^[13]. 而氮磷配施、有机肥氮磷配施、秸秆还田氮磷配施都能提高 CO₂ 释放速率^[14]. 到目前为止,对单独施加菌根菌肥和磷肥条件下收割后稻田 CO₂ 释放规律的研究尚少. 为此,探索氮肥、磷肥和菌肥 3 种施肥模式下水稻土 CO₂ 释放速率的差异性及空间变化规律,讨论土壤 CO₂ 释放速率与其影响因素的相关性,为深入探讨收割后稻田碳排放在全球气候变化及全球碳平衡中的作用提供基础数据和理论依据.

1 试验

1.1 研究地概况

本研究在城市水资源与水环境国家重点实验室的“农药化肥源头减量技术示范基地”进行,该基地位于黑龙江省双城市朝阳乡政安村,距双城市区 20 km. 地理位置:45°13.819'N, 126°22.611'E, 属于松花江流域. 水稻土类型为潜育型,有机质 26.32 mg·g⁻¹,水解氮 125.25 μg·g⁻¹,速效磷 120.63 μg·g⁻¹,速效钾 17.59 μg·g⁻¹.

1.2 试验材料

试验作物:水稻 (*Oryza sativa* L.). 菌根菌肥:核心菌为广适菌种——摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*).

1.3 试验设置

小区设置:整个试验区与农田防护林距离 50 m,外围设宽 6 m 的保护区. 小区面积为 36 m² (6 m×6 m),每个小区都用 2 mm 厚的土工膜做隔断处理,土工膜宽 80 cm,其中地下埋 50 cm 为地下水文阻断,地上留出 30 cm 作为地上的水文阻断. 各小区单独进水退水. 小区间间隔 1 m 做空间隔离,同时做人行道. 小区内部设保护行,宽度为 1 m,消除边际效应.

田间管理:大棚育秧,秧苗三叶期时移栽. 移栽时每个小区 20 垌,每垌 40 穴,每穴 3 棵基本苗. 水稻生长期间的水分管理按当地水稻高产要求进行.

施肥方案:在水稻移栽后第 15 天施肥,施肥方式有施加氮肥、施加磷肥、施加菌肥 3 种. 设置不施加肥料为空白对照. 每个处理及对照均设置

3 个重复,共 12 个样地,详细信息见表 1.

表 1 水稻田各小区施肥方案

施肥方式	编号	施加肥料种类及施肥量/(kg·hm ⁻²)		
		(NH ₄) ₂ SO ₄	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	菌根菌肥
对照	CK	0	0	0
施加氮肥	N	180	0	0
施加磷肥	P	0	600	0
施加菌肥	M	0	0	550

注:磷肥属于一等品,有效 P₄O₁₀ 质量分数 18%,游离酸质量分数 5.0%,水分质量分数 12.0%.

1.4 测定方法

土壤呼吸测定:在水稻收割后第 10 天,利用美国汉莎科学仪器公司生产的 CIRAS-2 全自动便携式光合系统对水稻土进行测定. 每小区随机选定 3 个测试点(选择在相邻的组成正方形的 4 株水稻的中心),每个测试点分别测定 0、10、20 cm 3 个界面的土壤 CO₂ 释放速率. 在每次测定前先将测定点土壤地表的凋落物清理干净,尽量不破坏土壤,以减少土壤扰动及根系损伤对测定结果的影响.

土壤含水率的测定:在测定土壤 CO₂ 释放速率的同时采集呼吸室附近的新鲜土壤样品,装入铝盒中带回实验室后采用烘干法(105 °C)测定.

1.5 统计分析

试验数据采用 SPSS13.0 软件进行分析.

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式下收割后稻田不同土层 CO₂ 释放速率

由图 1(a)可知,施加氮肥对水稻土 0 cm 界面 CO₂ 释放速率的促进作用最强烈,达 1.45 mol·m⁻²·s⁻¹,比 CK 高 97.73%. 水稻土 0 cm 界面 CO₂ 的释放速率对施加磷肥和施加菌肥的响应与 CK 相比,差异未达到统计学意义水平. 由图 1(b)可知,施加菌肥则对水稻土 10 cm 界面 CO₂ 的释放速率无显著性影响. 与 CK 相比,施加氮肥后水稻土 10 cm 界面 CO₂ 的释放速率降低 39.93%;施加磷肥后水稻土 10 cm 界面 CO₂ 的释放速率降低 33.84%. 由图 1(c)可知,与 CK 相比,施加氮肥后稻田下层土壤呼吸速率降低 31.36%,而施加磷肥后提高 48.03%,施加菌肥无显著影响.

由图 1 可知,不同施肥模式下水稻土 CO₂ 的释放速率差异有统计学意义. 由 CK 可知,水稻土 CO₂ 释放速率随着土壤深度的增加而逐渐增加. 施加氮肥显著提高了水稻土 0 cm 界面 CO₂ 的释放速率,但同时又强烈抑制了 10 和 20 cm 界面

CO₂ 的释放速率. 施加磷肥强烈抑制了 0 和 10 cm 界面 CO₂ 的释放速率, 但同时提高了水稻土

20 cm 界面 CO₂ 的释放速率. 施加菌肥对收割后稻田不同土层 CO₂ 的释放速率都无显著性影响.

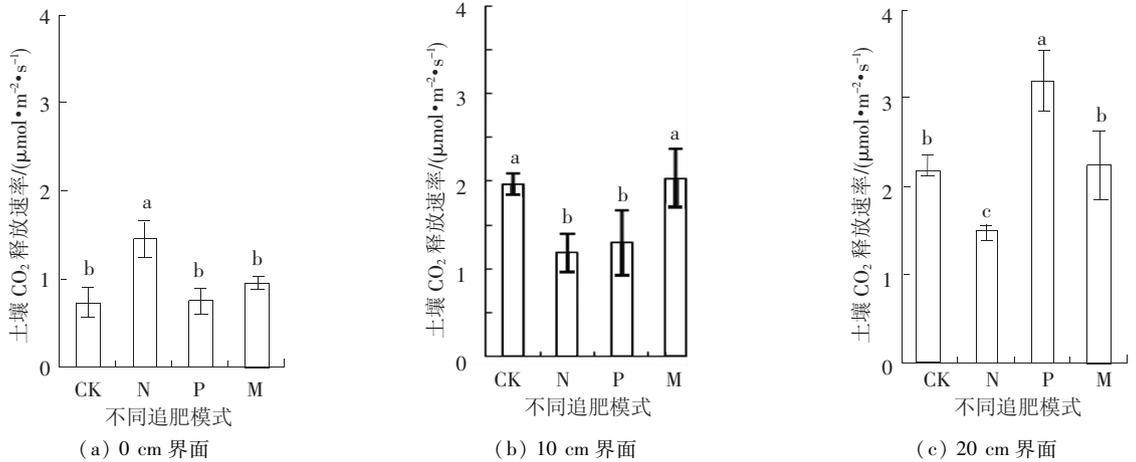


图 1 不同施肥模式下土壤 CO₂ 释放速率的空间动态

2.2 不同施肥模式下收割后稻田含水率的空间差异

不同施肥方式对土壤呼吸速率影响的途径之一是改变土壤的含水率, 测定不同施肥模式下收割后稻田土壤含水率的空间差异可以考证施肥模式影响土壤 CO₂ 释放速率的原因. 由图 2(a) 可知, 施加磷肥显著提高了水稻土 0 cm 界面土壤含水率(43.17%), 比 CK 高 16.95%, 而对施加氮肥和施加菌肥的响应与 CK 相比差异未达统计学意义水平.

由图 2(b) 可知, 施加氮肥和施加菌肥两种模式对收割后稻田 10 cm 界面土壤含水率的影响不显著. 施加磷肥则显著降低收割后稻田 10 cm 界

面土壤含水率, 降低幅度达 17.88%.

由图 2(c) 可知, 与 CK 相比, 施加磷肥显著降低了水稻土 20 cm 界面土壤含水率, 降低幅度达 11.99%. 而对施加氮肥和菌肥的响应与 CK 相比差异未达到统计学意义水平.

由图 2 可知, 不同施肥模式下收割后稻田土壤含水率存在空间差异. 对 CK 而言, 0 和 10 cm 界面土壤含水率差异无统计学意义, 但都显著高于 20 cm 界面. 施加磷肥显著提高了 0 cm 界面土壤含水率, 但同时强烈降低了 10 和 20 cm 界面土壤含水率. 施加氮肥和菌肥对水稻土 3 个界面的土壤含水率都无显著性影响.

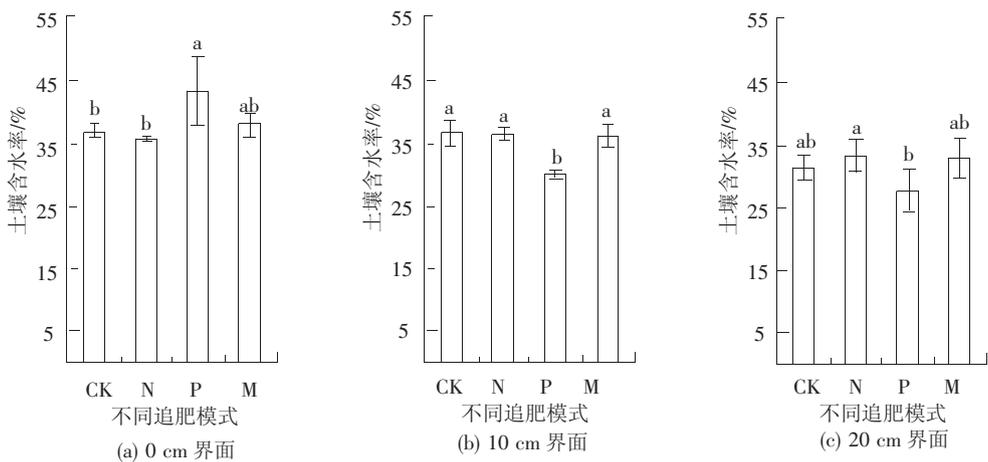


图 2 不同施肥模式下稻田土壤含水率的空间差异性

2.3 不同施肥模式下收割后稻田 CO₂ 释放速率与土壤含水率间的相关关系

土壤含水率是影响土壤 CO₂ 释放的重要因素之一. 水稻土 CO₂ 释放速率与土壤含水率之间的相关关系如表 2 所示. 可以看出, CK 的 0 cm 界

面土壤含水率与该层的土壤呼吸速率呈显著负相关. 而在 10 cm 界面二者关系为极显著负相关关系, 相关系数达 -0.998 0. 在 CK 的 20 cm 界面, 二者呈极显著正相关关系. 随着土壤深度的增加, 施加氮肥和施加磷肥两种处理对二者相关性的改

变程度依次减轻. 而施加菌肥处理则使土壤各界面二者的相关性都增强, 相关系数绝对值均大于0.9, 呈极显著相关关系.

表2 收割后稻田 CO₂ 释放速率与含水率间相关关系

施肥方式	土壤 CO ₂ 释放速率与土壤含水率相关系数		
	上层	中层	下层
CK	-0.655 2	-0.998 0*	0.858 7
N	0.962 4	0.285 9	0.754 9
P	0.680 3	-0.317 3	0.256 7
M	-0.996 7	-0.942 0	0.928 0

3 讨 论

3.1 不同土层土壤 CO₂ 释放速率影响因素分析

土壤 CO₂ 的释放受两个过程的影响, 一是土壤 CO₂ 的产生过程, 即土壤呼吸. 土壤呼吸受根系生物量、根系活性、微生物数量、微生物活性及土壤化学性质的影响. 二是土壤 CO₂ 从土壤向大气的传输过程, 包括 CO₂ 沿土壤剖面和在土壤表面的传输. 由实验可知, 施加氮肥、磷肥和菌肥后土壤 CO₂ 释放速率存在空间差异. 原因有3个: 一是氮肥和磷肥的施加改变了根系生物量和活性^[15]、微生物的数量和活性^[16]、土壤化学性质^[17], 从而引起土壤呼吸的变化; 二是不同的施肥方式直接造成的土壤呼吸速率的空间差异; 三是施肥改变了土壤和大气之间 CO₂ 梯度的强度、土壤孔隙度等, 从而影响了土壤 CO₂ 的传输速率^[18].

综上, 施肥通过改变土壤 CO₂ 的产生过程和土壤 CO₂ 的传输过程影响了表观土壤 CO₂ 释放, 从而表现出 CO₂ 释放的空间差异性.

3.2 施肥模式对收割后稻田 CO₂ 释放速率的影响

长期施用 (NH₄)₂SO₄ 对土壤有两种作用, 一是 NH₄⁺ 能够增加土壤微生物数量, 由于 NH₄⁺ 的不稳定性这一现象在土壤 0 cm 界面效果显著. 二是 SO₄²⁻ 对土壤具有酸化作用, SO₄²⁻ 的易迁移性使其在土壤的中下层具有强烈作用^[19]. 前者能够促进 0 cm 界面土壤呼吸, 从而提高 0 cm 界面土壤 CO₂ 释放速率; 后者抑制微生物的活性, 导致土壤 CO₂ 产生速率降低. 因此, 施加氮肥对土壤 CO₂ 释放速率的影响是通过改变微生物的数量和活性来实现的.

磷元素在植物和微生物的呼吸作用中起重要作用. 研究表明施加磷肥对作物根系有显著的增产效应^[20]. 同时, Ca²⁺ 作为多种酶的辅助因子能

促进作物发根^[17]. 根系生物量的增加是提高土壤 CO₂ 释放速率的因素之一. 根据施加磷肥对土壤呼吸速率的影响, 推断施加的磷和钙促进作物根系生长的增产效应可能发生在 20~30 cm 的外侧根.

菌根真菌对土壤 CO₂ 释放速率的影响有两方面: 一是促进土壤呼吸, 大量菌丝的存在直接加速了土壤呼吸速率, 刺激根际微生物数量的增加间接加速了土壤呼吸^[14]; 二是减少土壤 CO₂ 的释放, 在根系死亡后, 菌丝通过捕获养分并将其转化成难以降解的几丁质和球囊霉素相关蛋白等, 从而减少了土壤 CO₂ 的释放^[21]. 说明施加菌肥后土壤呼吸速率与 CK 差异无统计学意义的原因是菌根真菌促进土壤呼吸和增加土壤碳固持这两种作用相互平衡.

3.3 土壤含水率对土壤 CO₂ 释放速率的影响

土壤含水率是水稻根系和微生物进行生命活动的重要因素之一, 对土壤 CO₂ 的释放有重要影响. 一是通过影响土壤的孔隙度来影响土壤 CO₂ 的传输速率, 二是通过影响根系和微生物的生理过程及底物氧气的扩散来影响其呼吸速率, 直接影响土壤 CO₂ 的产生. 研究表明, 土壤水分和土壤呼吸速率的关系图是一个“倒扣钟形”^[17], 其最优的土壤水分状况接近田间最大持水量, 因为此时大空隙大部分被空气充填利于 CO₂ 的扩散, 小空隙大多被水分占据有利于可溶性基质的扩散^[16]. 鉴于此, 本实验出现不同的土壤界面二者的相关系数不同的现象.

4 结 论

1) 施加强度为 180 kg·hm⁻² 时, 氮肥能够提高收割后稻田 0 cm 界面 CO₂ 释放速率, 同时降低 10 和 20 cm 界面的土壤 CO₂ 释放速率.

2) 施加磷肥条件下, 水稻土自上而下 3 界面 CO₂ 释放速率为 0.75、1.30 和 3.25 μmol·m⁻²·s⁻¹. 表明施加磷肥能够使水稻土 20 cm 界面 CO₂ 释放速率提高 48.03%.

3) 施加菌根菌肥对收割后稻田土壤 CO₂ 的产生和传输无显著影响.

参 考 文 献:

- [1] WIGLEY T M L, RAPER S C B. Interpretation of high projections for global-mean warming [J]. Science, 2001, 293(5529): 451-454.
- [2] VOSE R S, EASTERLING D R, GLEASON B. Maximum and minimum temperature trends for the globe: an

- update through 2004[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(23): 238–242.
- [3] WEBB M J, SENIOR C A, SEXTON D M H, *et al.* On the contribution of local feedback mechanisms to the range of climate sensitivity in two GCM ensembles[J]. *Climate Dynamics*, 2006, 27(1): 17–38.
- [4] JENNIFER A B, STEVEN J D, DAVID B L. Greenhouse gas mitigation by agricultural identification [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010 (8): 12052–12057.
- [5] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623–1627.
- [6] GRACE J, RAYMENT M. Respiration in the balance [J]. *Nature*, 2000, 404: 819–820.
- [7] THUITHAISONG C, PARKPIAN P, SHIPIN O V, *et al.* Soil-quality indicators for predicting sustainable organic rice production[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42(5): 548–568.
- [8] KYAW K M, TOYOTA K. Suppression of nitrous oxide production by the herbicides glyphosate and propanil in soils supplied with organic matter [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(4): 441–447.
- [9] 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. *环境科学学报*, 2006, 26: 992–999.
- [10] MARSCHNER P, UMAR S, BAUMANN K. The microbial community composition changes rapidly in the early stages of decomposition of wheat residue[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(2): 445–451.
- [11] AERIS R, TOET S. Nutritional controls on carbon dioxide and methane emission from *Carex*-dominated peat [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29: 1683–1690.
- [12] SITAULA B K, BAKKEN L R, ABRAHAMSEN G. Nitrogen fertilization and soil acidification effects on nitrous oxide and carbon dioxide emission from temperate pine forest soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27: 1401–140.
- [13] 毕建杰, 劳秀荣, 周波, 等. 施肥与品种演替对麦田 CO₂ 排放量的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 165–170.
- [14] REN Wei, TIAN Hanqin, XU Xiaofeng, *et al.* Spatial and temporal patterns of CO₂ and CH₄ fluxes in China's croplands in response to multifactor environmental changes [J]. *Tellus Series B – Chemical and Physical Meteorology*, 2011, 63(2): 222–240.
- [15] 代贵金, 岩石真嗣, 三木孝昭, 等. 不同耕作与施肥方法对水稻根系生长分布和活性的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 200, 39(3): 274–278.
- [16] 时亚南, 张奇春, 王光火, 等. 不同施肥处理对水稻土壤微生物生态特性的影响[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2007, 33(5): 551–556.
- [17] 侯晓娟, 徐明岗, 李冬初, 等. 长期施用含硫含氯化肥稻田土壤化学性质的演变特征[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(12): 2460–2468.
- [18] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 1–133.
- [19] 孙艳杰, 南元涛, 魏国才, 等. 氮磷钾肥配施对玉米产量的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2011(4): 55–57.
- [20] AVIS T J, GRAVEL V, ANTOUN H, *et al.* Multifaceted beneficial effects of rhizosphere microorganisms on plant health and productivity [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(7): 1733–1740.
- [21] 石伟琦, 夏运生, 刘晓蕾. 丛枝菌根在草原生态系统碳固持中的重要作用[J]. *生态环境*, 2008, 17(2): 846–850.

(编辑 刘 彤)